日射量による昼光照度の推定方法に関する研究

A METHOD FOR THE ESTIMATION OF THE SOLAR ILLUMINANCE BASED UPON THE SOLAR IRRADIANCE

井川 憲 男*, 島崎 佐智代**, 中村 洋***

Norio IGAWA, Sachiyo SHIMASAKI and Hiroshi NAKAMURA

The solar irradiance and illuminance are important as meteorological data to predict indoor environment. However, the data concerning the daylight are not measured at the ordinary meteorological stations. The horizontal global irradiance is normally measured in the meteorological stations in Japan. The luminous efficacy, by which the irradiance can be converted into the illuminance, is essential for obtaining fundamental daylight data for the prediction of the daylight environment. The luminous efficacy has been investigated for a long time in the world. Several considerations have been put forward. But the sufficient theories on the luminous efficacy have not established yet. The relations between the diffuse irradiance and the diffuse illuminance, the direct normal irradiance and the direct normal illuminance, and the horizontal global irradiance and the horizontal global illuminance were examined and discussed based on the data acquired at the measurement of the IDMP station operated by the authors. The results of the examination are stated and the equations newly proposed by the authors on the luminous efficacies are introduced in this paper.

Keywords: Luminous efficacy, Irradiance, Daylight illuminance

発光効率、日射量、昼光照度

1. はじめに

室内の環境予測には、気象データが必須である。その中でも日射や昼光に関するデータは重要な基礎資料である。一般の気象台では日射の測定は行っているが、昼光に関する測定はほとんど行っていない。最近、二宮、赤坂らは、国内各所の AMeDAS の長期連続測定データを有効に活用し、AMeDAS の限られた測定項目から、熱負荷計算などに利用できる項目を推定し、全国約 840 地点の日射を含む気象データを作成している^{1,2,3}。

このような気象台で取得された日射（太陽放射）のデータや日射に関する気象データを昼光環境の予測や評価に適用するには、日射量（太陽放射照度）を昼光照度に変換しなければならない。それには発光効率が有用である。

発光効率に関する研究は、かなり以前から世界各地で行われ、かなりの研究報告がある。しかし、これらの既往の研究に示されている発光効率は、かなり大まかな検討であったり、限られた条件のデータによる検討であったりしている。このため、発光効率に関する高精度で汎用性の高い式はいまだ提案されていないとしても過言ではない。

本研究では、CIE^{註1}の IDMP^{註2}で取得したデータに基づく、水平面全天日射量（水平面グローバル放射照度）と水平面グローバル照度の関係、天空日射量（天空放射照度）と全天天空照度の関係、直

達日射量（直達放射照度）と直射照度の関係を検討し、日射量から昼光照度を推定する方法として発光効率を考察した。加えて、筆者らの IDMP の測定所で取得した実測データにより、入手が比較的容易である日射量から昼光照度を推定する変換式を提案する。

2. 発光効率の定義

発光効率は、地表に到達する可視域の日射の分光エネルギー量に分光視感度を乗じた値の累積、すなわち、昼光照度の、地表に到達する日射量の全波長域のエネルギー量に対する比として、次式で定義される。

$$\eta = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots (1)$$

ここで、

η : 発光効率 [lm/W]、

K_m : 最大視感度 [lm/W]^{註3}、

λ : 波長 [nm]、

$V(\lambda)$: 標準視感度 [-]^{註4}、

$I(\lambda)$: 波長 λ における日射エネルギー [W/m²・nm]、

である。

すなわち、発光効率の特性は、日射が大気を透過して地表に到達するときの、全波長域での消散と可視域での消散との関係が関与する。

* ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・工博

** 高知女子大学生生活科学部 助手・家修

*** 高知女子大学生生活科学部 教授・工博

Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.
Research Assoc., Faculty of Human Life and Environmental Science, Kochi Women's University, M. H. E.
Prof., Faculty of Human Life and Environmental Science, Kochi Women's University, Dr. Eng.

3. 日射量と昼光照明に関する予備的検討

昼光照明は、地表面に到達する日射量を視感度で補正した量である。大気を透過する日射の減衰の波長に対する依存性は、大気の状態により異なる。このため、日射量に対する昼光照明の比である発光効率¹⁾は固定した一定の値とはならない。

発光効率については、近年、本邦の内外で研究されている。

Littlefair, P. J. は 1958 年から 1984 年までの間に世界各地で公表された研究成果をレビューしている⁴⁾。そこに記載されている文献にはそれぞれ異なった発光効率が示されている。その他、最近の発光効率に関するいくつかの研究もある^{5, 6, 7, 8, 9, 10)}。しかし、いずれにも定説とするに値する知見はない。

図1 大気路程別の分光水平面全天日射量と、CIE 標準比視感度と分光水平面全天日射量の積

図2 大気路程別の分光水平面直達日射量と、CIE 標準比視感度と分光水平面直達日射量の積

図3 雲の光学的厚さ別の分光天空日射量と、CIE 標準比視感度と分光天空日射量の積

CIE の Technical Report¹¹⁾ には、大気外分光日射量にあわせて、地表における日射の分光特性についての基礎的データが、大気路程や雲の光学的厚さなどの条件別に示されている。この中に、波長 300nm から 2,300nm の日射量のモデル化した分光特性データがある。限られた波長域の資料であるが、これに基づき、日射量と昼光照明のおおよその関係を予備的に検討する。

図 1 に、大気外分光日射量と、大気路程 $m^{15)}$ を 1.0、1.5、2.0、5.6 としたときの地表における分光水平面全天日射量 $Eeg(\lambda)$ 、それらと CIE 標準比視感度との積 $V(\lambda) \cdot Eeg(\lambda)$ 、を示す。分光水平面全天日射量の全波長域の積分値は水平面全天日射量である。分光水平面全天日射量と CIE 標準比視感度の積の可視域での積分値に最大視感度を乗じると水平面グローバル照度が求まる。これによりグローバル照度に関する発光効率を推定する。

図 2 に、大気外分光日射量と、大気路程 m を 1.0、1.5、2.0、5.6 としたときの地表における分光水平面直達日射量 $Eesh(\lambda)$ 、それらと CIE 標準比視感度との積 $V(\lambda) \cdot Eesh(\lambda)$ 、を示す。分光水平面直達日射量と、分光水平面直達日射量と CIE 標準比視感度と最大視感度により、水平面直達日射量と水平面直射照度を求め、直射照度に関する発光効率を推定する。

図 3 に、大気外分光日射量と、地表面の反射率を 0.2、雲の光学的厚さ¹⁶⁾ を 3、10、30、100 としたときの地表面における分光天空日射量 $Eed(\lambda)$ 、それらと CIE 標準比視感度の積 $V(\lambda) \cdot Eed(\lambda)$ 、を示す。分光天空日射量と、分光天空日射量と CIE 標準比視感度と最大視感度により、天空日射量と全天空照度を求め、全天空照度に関する発光効率を推定する。

図 4 に、グローバル照度と水平面直射照度の大气路程に関する発光効率を示す。グローバル照度の発光効率は 105 ~ 115 [lm/W]、直射照度の発光効率は 70 ~ 110 [lm/W] の範囲にある。大気路程に関

図4 水平面照度の大气路程に関する発光効率

図5 全天空照度の雲の光学的厚さに関する発光効率

ならず、グローバル照度に関する発光効率の方が直射照度に関する発光効率より大きいようである。この二つの発光効率は大気路程が大きくなるほど小さくなるようである。すなわち、太陽高度が低くなるほど小さくとなると考えられる⁷⁾。

図5に全天空照度の雲の光学的厚さに関する発光効率を示す。全天空照度に関する発光効率は110～150[lm/W]の範囲にあり、雲の光学的厚さが大きくなるほど大きくなるようである。

なお、図1から図5における大気の状態は、500nmにおけるエアロゾルの光学的厚さ⁸⁾が0.2、オゾン全量⁹⁾が0.3cm、可降水量¹⁰⁾が2.0cmである。

以上は限られた条件での検討である。すべての条件での発光効率を表しているわけではないが、発光効率は固定した一定値ではなく、大気路程の関数として、また、雲の光学的厚さと関連した日射量の関数であることを示唆している。

4. 発光効率の推定

一般的に、大気の状態は大気透過率や混濁因子などを指標として表す。しかし、これらの指標はいずれも直達日射量や直射照度が得られるときのみ有効な指標であり、曇天時には適用できない。すなわち、直射光があるときの大気の状態だけを表しているに過ぎない。大気の汚染状態を発光効率の指標としていることもある。さらに、大気の湿度なども組み合わせて指標としている場合もある。晴天や曇天の別、季節や月などを指標として発光効率を表している例もある。いずれにしても、相当に大まかな指標であり、大気の状態を詳細かつ適切に表わしているとは思えない。汎用的、実用的で簡易な指標が必要である。

4.1 実測資料の収集とその整理

CIE¹¹⁾のIDMP¹²⁾と連携して、(株)竹中工務店(東京都江東区、139°39'04"E、35°40'04"N)では1992年3月から昼光と日射の測定を実施している。日射量と昼光照度の測定には、CIEのIDMPの測定法¹²⁾に準拠した精密全天日射計(MS-801:EKO)と照度計(ML-010S:EKO)を使用している。天空日射量と全天空照度の測定には、直径500mm、幅25mmの遮蔽リングを使用している。

発光効率の検討には、1992年3月から1993年9月までの測定で取得した、水平面全天日射量、天空日射量、直達日射量、水平面グローバル照度、全天空照度、直射照度のデータを適用した。データ数はそれぞれ約20,000個である。

発光効率の検討の資料とする日射量から推定する昼光照度は、日射量と太陽高度の関数として表した。このため、測定で取得したそれぞれの日射量と昼光照度を、太陽高度5°から75°まで5°の幅を帯域とする14のグループに分けた。

4.2 日射量から昼光照度を推定する変換式

本研究では、日射量の実測データから昼光照度を推定する手法を提案すること、したがって、日射量から昼光照度を推定する変換式を提案することが肝要である。

発光効率は太陽高度や天空の状態によって変化する。とくに、大気路程は、日射が大気を透過するときの消散の程度と直接関連する。したがって、発光効率を検討するには、実測で取得した日射量

と昼光照度のデータを、大気路程に関して整理することが必要である。大気路程は太陽高度の関数として表すことができるので、日射量と昼光照度の関係を太陽高度の関数として表すことにする。

地表面で測定により取得した日射量や昼光照度は、日射が大気を透過する過程における消散の影響を受けた結果である。すなわち、任意の太陽高度における地表面の日射量は、そのときの大気による消散の状況を総合的に示す最も直接的な指標と考える。

以上により、日射量から昼光照度を推定する変換式は、日射量と太陽高度の関数として次のように表すことにする。

$$Ev = f(Ee, \gamma_s) \quad [lx] \quad \dots\dots (2)$$

ここで、

Ev : 昼光照度 [lx]、

Ee : 日射量 [W/m²]、

γ_s : 太陽高度 [rad.]、

である。

なお、太陽高度は高い精度で求めることが肝要である。太陽位置の計算に必須の太陽の赤緯や均時差に関しては、比較的簡単で実用上十分な精度を有している山崎による近似式¹³⁾や、若干複雑であるが精度の高い海上保安庁による近似式¹⁴⁾などがある。本研究では後者を採用している。

4.3 天空日射量による全天空照度の推定

図6に、太陽高度帯30°から35°のときの天空日射量と全天空照度の関係を例示する。他の太陽高度も参照すれば、天空日射量と全天空照度にはかなり高い相関があるようである。全天空照度は天空日射量の関数として表現できると考える。

天空日射量と全天空照度の関係を次式で表すことにする。

$$Evd = a_d \cdot Eed^D \quad [lx] \quad \dots\dots (3)$$

ここで、

Evd : 全天空照度 [lx=lm/m²]、

Eed : 天空日射量 [W/m²]、

a_d 、 D : 未確定項、

である。

まず、基礎資料に基づき、太陽高度ごとに、式(3)による回帰分析を行い、それぞれの太陽高度帯に関する未確定項 a_d 、 D を得た。

次いで、得られた未確定項 D について、太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 D を定数0.9とした。これを図7に示す。

次に、未確定項 D に0.9を代入して、再度、実測データに基づき式(3)による回帰分析を試みた。それぞれの太陽高度帯に関して未確定項 a_d の値を得た。これを太陽高度の関数として回帰分析を重ね、未確定項 a_d について次式を得た。

$$a_d = 20.81 \cdot \gamma_s^3 - 86.57 \cdot \gamma_s^2 + 133.59 \cdot \gamma_s + 158.40 \quad [-] \quad \dots\dots (4)$$

式(4)を図8に図示する。

以上により、全天空照度は天空日射量と太陽高度の関数として、次式で推定できる。

$$Evd = (20.81 \cdot \gamma_s^3 - 86.57 \cdot \gamma_s^2 + 133.59 \cdot \gamma_s + 158.40) \cdot Eed^{0.9} \quad [lx] \quad \dots\dots (5)$$

全天空照度に関する発光効率は、次式で推定できる。

$$\eta_d = \frac{Evd}{Eed} = (20.81 \cdot \gamma_s^3 - 86.57 \cdot \gamma_s^2 + 133.59 \cdot \gamma_s + 158.40) \cdot Eed^{-0.1} \quad [lm/W] \quad \dots\dots (6)$$

ここで、

η_d : 全天空照度に関する発光効率 [lm/W]、
である。

4.4 直達日射量による直射照度の推定

図9に、太陽高度帯 30° から 35° のときの直達日射量と直射照度の関係を例示する。これによれば、直達日射量と直射照度にもかなり高い相関があるようである。直射照度も直達日射量の関数として表現できると考える。

天空日射量と全天空照度の関係と同様に、直達日射量と直射照度の関係を次式で表すことにする。

$$Evs = a_s \cdot Ees^S \quad [lx] \quad \dots\dots (7)$$

ここで、

Evs : 直射照度 [lx=lm/m²]、
 Ees : 直達日射量 [W/m²]、

a_s 、 S : 未確定項、

である。

以下、天空日射量と全天空照度の時と同様にして、図10に示すように未確定項 S を定数 1.1 とし、未確定項について次式を得た。

$$a_s = -7.87 \cdot \gamma_s^4 + 40.56 \cdot \gamma_s^3 - 78.43 \cdot \gamma_s^2 + 68.05 \cdot \gamma_s + 35.16 \quad [-] \dots (8)$$

式(8)を図11に図示する。

以上により、直射照度は直達日射量と太陽高度の関数として、次式で推定できる。

$$Evs = (-7.87 \cdot \gamma_s^4 + 40.56 \cdot \gamma_s^3 - 78.43 \cdot \gamma_s^2 + 68.05 \cdot \gamma_s + 35.16) \cdot Ees^{1.1} \quad [lx] \quad (9)$$

直射照度に関する発光効率は、次式で推定できる。

$$\eta_s = \frac{Evs}{Ees} = (-7.87 \cdot \gamma_s^4 + 40.56 \cdot \gamma_s^3 - 78.43 \cdot \gamma_s^2 + 68.05 \cdot \gamma_s + 35.16) \cdot Ees^{0.1} \quad [lm/W] \dots\dots (10)$$

ここで、

η_s : 直射照度に関する発光効率 [lm/W]、
である。

図6 天空日射量と全天空照度の関係

図7 太陽高度と未確定項 D の関係

図8 太陽高度と未確定項 a_d の関係

図9 直達日射量と直射照度の関係

図10 太陽高度と未確定項 S の関係

図11 太陽高度と未確定項 a_s の関係

4.5 水平面全天日射量と水平面グローバル照度の関係

図12に、太陽高度帯30°から35°のときの水平面全天日射量と水平面グローバル照度の関係を例示する。他の高度帯も参照すれば、水平面全天日射量と水平面グローバル照度にもかなり高い相関があるようである。

水平面グローバル照度は、その値が小さいときは全天空照度の、大きいときは直射照度の特性が支配的と考えられる。したがって、水平面全天日射量と水平面グローバル照度の関係は、天空日射量と全天空照度の関係 ($Evd = a_d \cdot Eed^{1.1}$) と、直達日射量と直射照度の関係 ($Evs = a_s \cdot Evs^{0.9}$) の加重和と考え、次式で表すこととした。

$$Evg = a_{g1} \cdot Eeg^{0.9} + a_{g2} \cdot Eeg^{1.1} \quad [lx] \quad \dots (11)$$

ここで、

Evg : 水平面グローバル照度 [$lx = lm/m^2$]、

Eeg : 水平面全天日射量 [W/m^2]、

a_{g1} 、 a_{g2} : 未確定項、

である。

図12 全天日射量とグローバル照度の関係

図13 太陽高度と未確定項 a_{g1} の関係

図14 太陽高度と未確定項 a_{g2} の関係

前項と同様に、未確定項 a_{g1} 、未確定項 a_{g2} を次のように得た。

$$a_{g1} = 8.86 \cdot \gamma_s + 210.12 \quad \dots (12)$$

$$a_{g2} = -10.98 \cdot \gamma_s^4 + 54.16 \cdot \gamma_s^3 - 102.31 \cdot \gamma_s^2 + 90.21 \cdot \gamma_s - 29.24 \quad \dots (13)$$

式(12)と式(13)を図13、図14に図示する。

以上により、水平面グローバル照度は、水平面全天日射量と太陽高度の関数として、次式で推定できる。

$$Evg = (8.86 \cdot \gamma_s + 210.12) \cdot Eeg^{0.9} + (-10.98 \cdot \gamma_s^4 + 54.16 \cdot \gamma_s^3 - 102.31 \cdot \gamma_s^2 + 90.21 \cdot \gamma_s - 29.24) \cdot Eeg^{1.1} \quad [lx] \quad (14)$$

水平面グローバル照度に関する発光効率を、次式で表せる。

$$\eta_g = \frac{Evg}{Eeg} = (8.86 \cdot \gamma_s + 210.12) \cdot Eeg^{-0.9} + (-10.98 \gamma_s^4 + 54.16 \gamma_s^3 - 102.31 \gamma_s^2 + 90.21 \gamma_s - 29.24) \cdot Eeg^{-0.1} \quad [lm/W] \quad \dots (15)$$

ここで、

η_g : 水平面グローバル照度に関する発光効率 [lm/W]、

である。

4.6 太陽高度や日射量と発光効率の関係

式(6)、式(10)、式(15)に示した発光効率について、日射量と太陽高度との関係を整理して図15から図17に示す。

図15に示す全天空照度に関する発光効率は、太陽高度が高いほど大きい。また、天空日射量が小さいほど発光効率は大きい。すなわち、雲の光学的厚さが薄いほど発光効率が小さくなる傾向を示している。

図16に示す直射照度に関する発光効率も、太陽高度が高いときほど大きい。しかし、全天空照度に関する発光効率と異なり、一般に直達日射量が小さいほど発光効率は小さい。この傾向は太陽高度が30°から40°以上のとき顕著になる。最小値は60～70 [lm/W]で図3に示したCIEのTechnical Report¹¹の推奨値に基づく推定値とほぼ一致している。

図17に示す水平面グローバル照度に関する発光効率も太陽高度が高くほど大きい。また、全天空照度に関する発光効率と同様に、全天日射量が小さいほど発光効率は大きい傾向がある。

以上は、前述の「3. 日射量と昼光照明に関する予備的検討」の結果とかなりよく一致している。また、発光効率に関する既往の研究における種々の発光効率の提案値をほぼ包含している。

5. 日射量から昼光照明を推定する変換式の検討

本研究で提案する日射量から照度を推定する変換式の妥当性を検討する。回帰分析に使用した実測データを用い、測定で直接取得した昼光照明と日射量から推定した昼光照明を比較する。

図18に、太陽高度帯10°から15°、30°から35°、50°から55°のとき、実測で直接取得した全天空照度と、同時に取得した天空日射量から式(5)で推定した全天空照度との比較を例示する。いずれの場合も高い相関を示している。

図19に、図18と同様に実測で直接取得した直射照度と、同時に取得した直達日射量から式(9)で推定した直射照度との比較を例示する。全天空照度に関する図18と比較すると、太陽高度が低いとき、ややばらつきはあるが、全体的には高い相関を示している。

図 15 全天空照度に関する発光効率: η_d [lm/W] 図 16 直射照度に関する発光効率: η [lm/W] 図 17 グローバル照度に関する発光効率: η_g [lm/W]

表 1 実測で取得した昼光照度と日射量から推定した昼光照度の太陽高度帯別の相関係数

太陽高度帯 [deg.]	全天空照度に関する 相関係数 [-]	直射照度に関する 相関係数 [-]	グローバル照度に関する 相関係数 [-]
5~10	0.9781	0.7152	0.9817
10~15	0.9712	0.8931	0.9819
15~20	0.9778	0.9266	0.9813
20~25	0.9786	0.9527	0.9944
25~30	0.9716	0.9654	0.9950
30~35	0.9854	0.9740	0.9959
35~40	0.9840	0.9770	0.9958
40~45	0.9867	0.9792	0.9960
45~50	0.9871	0.9781	0.9956
50~55	0.9854	0.9810	0.9958
55~60	0.9765	0.9787	0.9954
60~65	0.9630	0.9767	0.9952
65~70	0.9747	0.9775	0.9962
70~75	0.9829	0.9805	0.9976

図 20 に、図 18 や図 19 と同様に実測で直接取得した水平面グローバル照度と、同時に取得した水平面全天日射量から式(14)で推定した水平面グローバル照度との比較を例示する。

表 1 に、実測により直接取得した昼光照度と日射量から推定した昼光照度の相関係数を太陽高度別に示す。ほとんどで 0.9 以上の高い相関係数となっている。

以上、実測により直接取得した昼光照度と日射量から推定した昼光照度は、全体的に非常に高い相関を示していると考ええる。

次に、気象庁の 1995 年のデータにより、日射量の昼光照度への変換を試みた。ここでは、札幌、東京、福岡の気象庁のデータによる変換例を示す。

まず、各地域の水平面全天日射量を直散分離して、直達日射量と天空日射量を求めた。直散分離については、曾我、赤坂らにより各種モデルの比較と評価が行われているが¹⁵、ここでは、簡易で精度の高いとされる Skartveit, A. らによる式¹⁶で直散分離を行った。続いて、水平面全天日射量、直達日射量、天空日射量を式(5)、式(9)、式(14)により、水平面グローバル照度、直射照度、全天空照度に変換した。さらに直射照度から水平面直射照度を求め、これと全天空照度により水平面グローバル照度を合成した。図 21 に、各地域における、合成した水平面グローバル照度と水平面全天日射量から変換した水平面グローバル照度の関係を示す。両者は、いずれの地域においても、ほぼ同一であり、その相関係数は 0.999 以上である。すなわち、本研究で提案する日射量から昼光照度を推定する変換式は、そのそれぞれの相互の整合性が高い。また、個別に適用することが可能であることも示している。

以上、式(5)、式(9)、式(14)は、いずれも日射量から昼光照度を推定する変換式として、十分に実用に供し得ると考える。

6. まとめ

本邦では、昼光に関する定常的な測定は、IDMP の測定以外に、ほとんど実施されていない。最も容易に入手できる太陽放射に関す

図 18 実測で取得した全天空照度と、式(5)で天空日射量から推定した全天空照度の比較例

図 19 実測で取得した直射照度と、式(9)で直達日射量から推定した直射照度の比較例

図 20 実測で取得した水平面グローバル照度と、式(14)で水平面全天日射量から推定した水平面グローバル照度の比較例

図 21 水平面全天日射量の直散分離による直達日射量と天空日射量から推定した直射照度と全天空照度を合成した水平面グローバル照度と、水平面全天日射量から推定した水平面グローバル照度の関係（気象庁 1995 年の、札幌、東京、福岡のデータによる）

る実測データは、気象台で1時間ごとに測定している水平面全天日射量である。したがって、日射量から昼光強度を推定するための、高精度で汎用的な変換式が不可欠である。このため、本研究では、日射量と昼光強度の実測データを基に、日射量から昼光強度を推定する方法を検討し、次の結果が得られた。

(1) 天空日射量、直達日射量、全天日射量とその時の太陽高度から、全天空照度、直射照度、グローバル照度をそれぞれ推定できる変換式を提案することができた。

(2) 提案した日射量から昼光強度を推定する変換式の構造はさほど複雑ではない。

(3) 変換式は各種気象データに含まれる日射量のデータに容易に適用可能である。

(4) 日射量から推定した昼光強度と実測で取得した昼光強度の相関は高く、実用的に十分な精度を有していることが確認できた。

すなわち、本研究の成果により、あらゆる天空状態において、日射量により昼光強度を容易に推定することが可能になった。また、省エネルギーや室内環境の質をも考慮した、温熱環境や昼光環境の予測評価と実際の計画、設計に有用な精度の高い資料の入手が容易になった。以上、本研究は建築環境工学の発展と向上に大きく寄与するものと信じる。

注記

注1) CIE: Commission Internationale de l'Eclairage (国際照明委員会)、照明に関する基準や標準を定めたり、これらを勧告したり、また、研究の交流を計る国際機関で、照明関係のISO規格の原案も作成している。100年の歴史を誇り、現在、先進国を中心に約40ヶ国余が加盟している。

注2) IDMP: International Daylight Measurement Programme (国際昼光測定プログラム)、化石エネルギーに代替すべき自然エネルギーである昼光や日射に関し、その実態を示す資料が乏しい現況を憂えたCIEが1983年に開始した世界的規模での昼光と日射の実測資料の収集と整備の活動である。この実施のためにCIEは技術委員会TC3-25を設けている。1991年頃以降から、本邦に開設された12ヶ所の測定所を始め、世界各地に約50ヶ所の測定所が設置され、常時1分ごとのデータを測定している。共著者の中村は、1998年までTC3-25の委員長を務め、以後、委員である。井川も委員を務めている。http://idmp.entpe.fr/ 参照。

注3) 最大視感度は、周波数 540×10^{12} Hz の単色光(空気中の波長で555nm)に対する視感度である。量記号 K_m で表し、その値は、近年、683 [lm/W] とされている。標準比視感度の基準とされている。

注4) 分光視感度の最大視感度に対する比を比視感度という。国際照明委員会(CIE)は明所視と暗所視における平均的な比視感度として標準比視感度を定めている。一般的に比視感度といえば、明所視の標準比視感度のことを指す。量記号 $V(\lambda)$ で表す。(CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision 参照)。

注5) 大気路程 m は、日射が大気を透過して地表に到達するまでの空気量を、太陽が天頂にあるときの空気量を1とする相対値である。太陽高度の関数として表せるとし、Kittler, R. は下式を提案している。

$$m = 2 \cdot (\sqrt{\sin^2 \gamma_s + 0.0031465} - \sin \gamma_s) / 0.0031465 \quad [-]$$

注6) 雲の光学的厚さ τ は、雲による日射の減衰の度合いを示す指標で、雲により日射が $e^{-\tau}$ に減衰することを意味する。

注7) Kittler, R. の式(注5)に見られるように、太陽高度が低いほど、大気路程は一般的に大きい。

注8) エーロゾルの光学的厚さは、エーロゾルによる混濁度(消散の度合い)を示す指標で、光を減衰させる媒質の密度を ρ 、単位質量あたりの消散係数を $s(\lambda, x)$ とすると、大気全層のエーロゾルの光学的厚さは、 $s(\lambda) = \int_0^\infty s(\lambda, x) \rho dx$ で表わせる。 $s(\lambda) = 0.1$ がリンケの混濁因子2.8(晴天空)に相当する。

注9) オゾン全量[cm]は、地上から上空にあるすべてのオゾン分子を集め、標準状態で換算したときの厚さで示す。オゾン全量は、地球上の場所や季節などで異なり、北緯80°から北緯90°の3月頃に最も多く0.44cm程度、赤道付近が最も少なく0.26cm程度である。

注10) 可降水量[cm]は、大気中の水蒸気量を表す指標で、地上に鉛直に立てた気柱に含まれる全水蒸気量を水の量に換算したときの厚さで示す。

参考文献

- 1 二宮秀典、赤坂裕、須貝高、黒木莊一郎、AMeDASのデータを用いた時刻別日射量の推定法、空気調和・衛生工学会論文集、No. 39, pp. 13-23, 1989.
- 2 二宮秀典、赤坂裕、松尾陽、曾我和弘、AMeDASのデータを用いた時刻別日射量の推定法、第2報 回転式日照計および改良型太陽電池式日照計への適用、空気調和・衛生工学会論文集、No. 65, pp. 53-65, 1997.
- 3 赤坂裕、建築環境評価のためのAMeDAS版時刻別気象データの作成、平成8年度文部省科学研究費補助金(基盤研究A)研究成果報告書、1998.
- 4 Littlefair, P. J., The Luminous Efficacy of Daylight: a Review, Lighting Research & Technology, Vol. 17, No. 4, pp.162-182, 1985.
- 5 宿谷昌則、木村建一、昼光の発光効率による毎時水平面日射量からの照度の推定、日本建築学会論文報告集、第293号、pp. 85-95, 1980.
- 6 Littlefair, P.J., Measurements of the Luminous Efficacy of Daylight, Lighting Research & Technology, No. 20, pp.177-188, 1988.
- 7 Koga, Y., Nakamura, H., Oki, M., Matsuzawa, T., Rahim, M.M., Study on Luminous Efficacy - The Relation to Cloud Ratio, LUX EUROPA 1993, Edinburgh, pp. 799-803, 1993.
- 8 Molineaux, B., Ineichen, P., Delaunay, J.J., Direct Luminous Efficacy and Atmospheric Turbidity Improving Model Performance, Solar Energy, Vol.55, No.2, pp.125-137, 1995.
- 9 Darula, S., Kittler, R., Daylighting Availability after One-minute Measurements for Energy Conscious Design, Proc. Conf. Building Physics Symposium, pp.243-248, 1995.
- 10 Chandra, M., Luminous Efficacy of Solar Radiation and Evaluation of Natural Illumination - a Review, Energy Convers. Mgmt., No.11, pp.1623-1634, 1996.
- 11 Solar Spectral Irradiance, Technical Report, Pub. No CIE 85, ISBN 3 900 734 22 4, pp. 1-43, 1989.
- 12 Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, Technical Report, Pub. No CIE 108, ISBN 2 9000 734 50 X, pp. 1-49, 1994.
- 13 山崎均、日照環境のための基礎式、日本建築学会計画系論文集、第288号、pp. 139-146, 1980.
- 14 太陽位置略算式、天測略歴、海上保安庁、pp. 1s-2s, 1987.
- 15 曾我和弘、赤坂裕、二宮秀典、全天日射量から直達日射量と天空日射量を推定する各種モデルの比較と評価、日本建築学会計画系論文集、第512号、pp. 17-27, 1998.
- 16 Skartveit, A., Olseth, J.A, A model for the diffuse fraction of hourly global radiation, Solar Energy Vol.38, No. 4, pp. 271-274, 1987.

(1999年5月7日原稿受理、1999年8月2日採用決定)